

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

平面扫描式 X 射线尺寸测量机校准规范

Calibration Specification for Planar Scanning X-Ray Dimensional
Measuring Machine

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

平面扫描式 X 射线尺 寸测量机校准规范

Calibration Specification for
Planar Scanning X-Ray
Dimensional Measuring Machine

JJF XXXX-XXXX

归口单位：全国几何量长度计量技术委员会

主要起草单位：深圳市计量质量检测研究院

中国计量科学研究院

参加起草单位：广州计量检测技术研究院

深圳中国计量科学研究院技术创新研究院

本规范委托全国几何量长度计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

目 录

引 言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和计量单位	1
4 概述	2
5 计量特性	3
6 校准条件	3
6.1 环境条件	3
6.2 校准通用要求	4
7 校准项目和校准方法	5
7.1 探测形状误差	5
7.2 线宽测量示值误差	6
7.3 圆直径测量示值误差	7
7.4 圆柱直径测量示值误差	7
7.5 球直径测量示值误差	8
7.6 球心距测量示值误差	8
7.7 多视野测量尺寸示值误差	8
7.8 结构分辨力	9
8 校准结果表达	9
9 复校时间间隔	9
附录 A 原始记录格式	10
附录 B 校准证书内页格式	16
附录 C 圆柱直径测量不确定度评定示例	20

引 言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范为首次发布。

平面扫描式 X 射线尺寸测量机校准规范

1 范围

本校准规范适用于具有二维或三维几何尺寸测量功能的平面扫描方式的 X 射线尺寸测量机的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1071—2010 国家计量校准规范编写规则

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示

JJF (兵工民品) 0022-2023 X 射线三维尺寸测量机校准规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

下列术语和定义适用于本规范。

3.1 有效测量视野 effective measurement field of view

MFOV

一次扫描重建中，平面扫描 X 射线在线测量仪可扫描重建的最大范围有效三维数据在平行探测器平面上的矩形投影平面区域大小。在该区域内的重建三维数据质量应达到仪器标称要求。

注：对于特定的平面扫描 X 射线在线测量仪，MFOV 与成像放大倍率有关。

3.2 单视野测量模式 measurement mode of single field of view

平面扫描式 X 射线尺寸测量机在单个有效测量视野内重建数据进行计算分析得到测量结果的模式。

3.3 多视野测量模式 measurement mode of multi-field of view

平面扫描式 X 射线尺寸测量机利用多个有效测量视野内的重建数据拼接为整体进行计算分析得到测量结果的模式。

3.4 探测形状误差 probing form error

E_p

单视野测量模式下，在平面扫描式 X 射线尺寸测量机重建的标准球三维数据的球面上均匀采样测量数据点，进行最小二乘圆柱拟合计算得到的高斯拟合球的半径变化量。

3.5 线宽测量示值误差 line width measurement error

E_w

单视野测量模式下，由平面扫描式 X 射线尺寸测量机重建的线宽标准器测量数据点得到的平面线宽尺寸测量值与标准值之差。

3.6 圆直径测量示值误差 circle measurement error

$$E_c$$

单视野测量模式下，由平面扫描式 X 射线尺寸测量机重建的圆形标准器测量数据点得到的平面圆直径测量值与标准值之差。

3.7 圆柱直径测量示值误差 cylinder diameter measurement error

$$E_{CD}$$

单视野测量模式下，在平面扫描式 X 射线尺寸测量机重建的圆柱标准器三维数据圆柱表面均匀采样测量数据点，进行最小二乘圆柱拟合计算得到的圆柱直径测量值与标准值之差。

3.8 球直径测量示值误差 sphere diameter measurement error

$$E_s$$

单视野测量模式下，在平面扫描式 X 射线尺寸测量机重建的标准球三维数据的球面上均匀采样数据点，采用最小二乘法拟合计算得到的拟合球直径测量值与标准值之差。

3.9 球心距测量示值误差 spherical center distance measurement error

$$E_{SD}$$

单视野测量模式下，在平面扫描式 X 射线尺寸测量机重建的标准球板（棒）三维数据的两个球面上均匀采样数据点，采用最小二乘法拟合计算得到的两个球心坐标间距测量值与标准值之差。

3.10 多视野测量尺寸示值误差 length measurement error of multi-field of view

$$E_{MFOV}$$

多视野测量模式下，平面扫描式 X 射线尺寸测量机的球心距测量示值误差。

3.11 结构分辨力 spatial resolution

X 射线尺寸测量机鉴别和区分高对比度微小细节特征的能力。

3.12 重建拍摄图像数 scanning imaging number

完成单个有效测量视野三维数据重建，X 射线平板探测器拍摄的图像数。

4 概述

4.1 原理

平面扫描式 X 射线尺寸测量机基于锥束射线倾斜扫描和计算分层成像技术（Computed Laminography, CL），利用不同角度下 X 射线倾斜照射物体后的投影信息对物体内部进行三维重建测量，适用于板状物体的二维尺寸、三维尺寸等内部结构尺寸和缺陷的测量，如印刷电路板、机械产品等的检测，广泛应用于无损检测、材料分析等领域。

4.2 结构

平面式 X 射线尺寸测量机主要是由 X 射线源、载物台、被测样品、X 射线探测器以及重构软件构成，典型平面式 X 射线尺寸测量机结构示意图见图 1 所示，平面式 X 射线尺寸测量机的典型扫描方式包括旋转式扫描和平移式扫描，如图 2 所示。

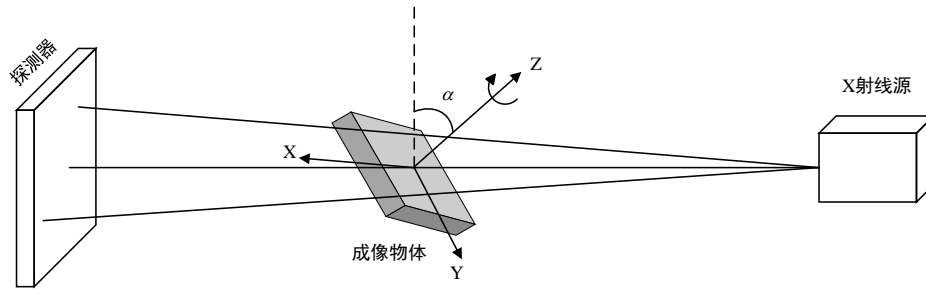


图 1 典型平面式 X 射线尺寸测量机结构示意图

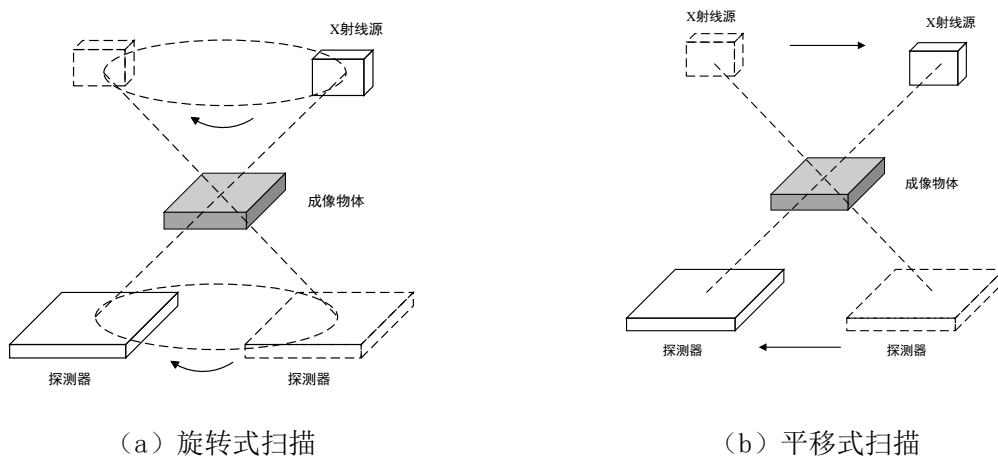


图 2 典型平面式 X 射线尺寸测量机扫描方式

5 计量特性

- 5.1 探测形状误差 (E_p)
- 5.2 线宽测量示值误差 (E_w)
- 5.3 圆直径测量示值误差 (E_C)
- 5.4 圆柱直径测量示值误差 (E_{CD})
- 5.5 球直径测量示值误差 (E_s)
- 5.6 球心距测量示值误差 (E_{SD})
- 5.7 多视野测量尺寸示值误差 (E_{MFOV})

注：对仅有单视野测量模式的平面扫描 X 射线尺寸测量机不校准此项。

6 校准条件

- 6.1 环境条件

环境条件应满足以下要求：

- a) 温度： $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ ；
- b) 相对湿度： $\leq 60\%$ ；
- c) 实验室无灰尘、振动、噪音、磁场等影响。

6.2 校准通用要求

6.2.1 平面扫描 X 射线尺寸测量机启动并完成 X 射线源预热，X 射线源预热时长应满足制造厂商操作手册给出的要求。

6.2.2 若仪器 X 射线源为开管源，X 射线管真空度符合仪器说明书要求、功率能够稳定输出。

6.2.3 确认平面扫描 X 射线尺寸测量机已完成系统标定，处于正常工作状态。

6.2.4 对于无载物支撑平台的平面扫描 X 射线尺寸测量机，应按照仪器制造商使用说明，准备好合适的夹具，确保标准器可稳固放置于仪器测量空间范围内。

6.2.5 对所有的校准项目，至少选择在仪器最小 MFOV（最高放大倍率）和常用 MFOV（常用放大倍率）下进行校准，可根据用户实际需求增加不同 MFOV（不同放大倍率）下的校准。

6.2.6 校准时应按照日常使用状态条件设置平面扫描 X 射线尺寸测量机的管电压、管电流、放大倍率、扫描时间、重建拍摄图像数、重建体素尺寸等测量控制参数，并在原始记录中给出。

6.3 标准器及其他设备

6.3.1 标准器和主要校准设备应经过计量校准并经确认，标准器和其他设备的技术要求见表 1。

6.3.2 推荐使用表 1 所列标准器及其他设备，也可以使用其他满足技术要求的校准设备进行校准。

表 1 标准器及其他设备

序号	校准项目	标准器	
		名称	技术要求
1	探测形状误差 (E_p)	红宝石标准球	表面粗糙度 $R_a \leq 0.05 \mu\text{m}$ ；形状误差经过校准，形状误差 MPE： $1.0 \mu\text{m}$ 。球直径 3mm 或 5mm。
2	线宽测量示值误差 (E_w)	线宽标准器	玻璃基板镀金或钨构成的二维栅格掩模板，金或钨镀层厚度不小于 $1 \mu\text{m}$ ，线宽尺寸 (3~50) μm ，校准值扩展不确定度 $U \leq 0.3 \mu\text{m} (k=2)$ 。
3	圆直径测量示值误差 (E_c)	圆直径标准器	玻璃基板镀金或钨构成的圆形掩模板，金或钨镀层厚度不小于 $1 \mu\text{m}$ ，圆直径 (5~50) μm ，校准值扩展不确定度 $U \leq 0.5 \mu\text{m} (k=2)$ 。

4	圆柱直径测量示值误差 (E_{CD})	圆柱标准器	圆柱直径 (0.05~1) mm, 校准值扩展不确定度 $U \leq 1 \mu\text{m}$ ($k=2$)。
5	球直径测量示值误差 (E_S)	红宝石标准球	球表面粗糙度 $R_a \leq 0.05 \mu\text{m}$, 球直径不大于 MFOV 的 50%, 球直径校准值扩展不确定度 $U \leq 1 \mu\text{m}$ ($k=2$)。
6	球心距测量示值误差 (E_{SD})	红宝石球棒/球板	球表面粗糙度 $R_a \leq 0.05 \mu\text{m}$, 球直径 3mm 或 5mm; 球心距不小于 MFOV 的 30%, 不大于 MFOV 的 80%; 球心距校准值扩展不确定度 $U \leq 1 \mu\text{m}$ ($k=2$)。
7	多视野测量尺寸示值误差 (E_{MFOV})	红宝石球棒/球板	表面粗糙度 $R_a \leq 0.05 \mu\text{m}$, 球直径 3mm 或 5mm, 球心距不小于 MFOV 的 5 倍, 不大于仪器最大有效测量范围的 80%, 校准值扩展不确定度 $U \leq 1 \mu\text{m}$ ($k=2$)。
8	结构分辨力	分辨力卡	玻璃或硅材料基底镀金或钨构成的线栅格分辨力卡, 线条宽度 (1~20) μm , 线宽校准值扩展不确定度 $U \leq 0.3 \mu\text{m}$ ($k=2$)。

7 校准项目和校准方法

7.1 探测形状误差 (E_p)

7.1.1 选择 MFOV 小于或等于 30mm 的放大倍率测量时, 使用标称球直径为 3mm 的红宝石标准球进行校准; 选择 MFOV 大于 30mm 的放大倍率测量时, 使用标称球直径为 5mm 的红宝石标准球进行校准。

7.1.2 将标准红宝石球放置于载物台上 (或使用夹具固定), 选择仪器测量空间范围内的 3 个不同位置进行校准。3 个位置大致分布如图 3 所示, 除中心点位置外, 另外两个位置也可选择以中心点为对称中心的对称位置。

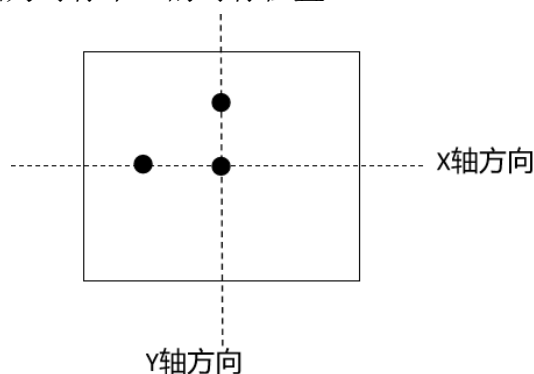


图 3 测量位置分布图

7.1.3 根据仪器使用说明书要求, 按照用户实际测量应用条件, 完成重建拍摄图像数、扫描速度 (或扫描时间) 等系统参数设置后, 对标准红宝石球进行扫描重建, 获得红宝石标准球三维体数据。由于平面扫描特性, 标准球重建得到的三维数据不是完整球形, 其形状如图 4 所示, 选取标准球有效区域数据进行测量分析。有效区域数据选取原则为

沿 Z 轴方向，从球中心到上下边缘截取球体数据，截断平面间距离应不小于球直径的 60%。

7.1.4 使用仪器自带或第三方测量软件在有效三维数据球面均匀分布采集不小于 25 个测量点，探测采点分布如图 4 所示，利用最小二乘法拟合高斯球面。计算各测量位置选定球冠表面数据点与球心之间的距离 R_i ，其中最大距离 $R_{\max,i}$ 与最小距离 $R_{\min,i}$ 之差即为该位置的探测形状误差 $P_{F,i}$ 按式（1）计算。

$$P_{F,i} = R_{\max,i} - R_{\min,i} \quad (1)$$

式中：

$P_{F,i}$ —— i 位置的重构球面的探测形状误差，mm；

$R_{\max,i}$ —— i 位置的重构球面测量点与高斯拟合球心的最大距离，mm；

$R_{\min,i}$ —— i 位置的重构球面测量点与高斯拟合球心的最大距离，mm。

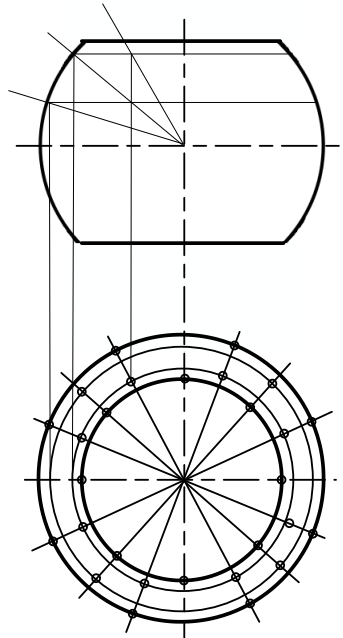


图 4 采点分布

7.1.5 取 3 个位置中的探测形状误差的最大值作为最终测量结果。校准探测形状误差过程中使用的测量策略和评定设置，如：球面采集测量点数，测量点分布方式和拟合方式，应记录在原始记录中，如果使用到粗差去除和滤波设置，也应记录在原始记录中，原始记录格式见附录 A。

7.2 线宽测量示值误差 (E_w)

7.2.1 选择 MFOV 小于或等于 30mm 的放大倍率测量时，根据仪器实际测量能力，在 $1\mu\text{m}$ 、 $3\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $15\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 规格中大致按均匀分布原则选择三个线宽尺寸进行校准；选择 MFOV 大于 30mm 的放大倍率测量时，根据仪器实际测量能力，在 $10\mu\text{m}$ 、

15 μm 、20 μm 、30 μm 、50 μm 规格中大致按均匀分布原则选择三个线宽尺寸进行校准。对每个放大倍率，按照7.2.2~7.2.4步骤进行校准。

7.2.2 线宽标准器放置于载物台上（或使用夹具固定），选择仪器测量空间范围内的3个不同位置进行校准，位置参考7.1.2。每个位置对各校准尺寸点测量一次。

7.2.3 参照仪器使用说明书，根据用户实际测量应用要求，完成重建拍摄图像数、扫描速度等系统参数设置后，对线宽标准器进行扫描重建，获得线宽标准器三维体数据。

7.2.4 使用仪器自带或第三方测量软件对重建得到的线宽特征进行切片分析，提取线宽特征边缘数据点采用最小二乘法拟合直线计算线间距，得到的线宽尺寸测量值与校准值之差即为校准结果。

7.3 圆直径测量示值误差（ E_C ）

7.3.1 选择MFOV小于或等于30mm的放大倍率测量时，选用5 μm 、10 μm 、20 μm 规格的三个圆直径尺寸进行校准；选择MFOV大于30mm的放大倍率测量时，选用10 μm 、20 μm 、50 μm 规格的圆直径尺寸进行校准。对每个放大倍率，按照7.3.2~7.3.4步骤进行校准。

7.3.2 将圆直径标准器放置于载物台上（或使用夹具固定），选择仪器测量空间范围内的3个不同位置进行校准，位置参考7.1.2。每个位置对各校准尺寸点测量一次。

7.3.3 参照仪器使用说明书，根据用户实际测量应用要求，完成重建拍摄图像数、扫描速度等系统参数设置后，对圆直径标准器进行扫描重建，获得圆直径标准器三维体数据。7.3.4 使用仪器自带或第三方测量软件对重建得到的圆直径宽特征进行切片分析，提取圆特征边缘数据点采用最小二乘法拟合圆并计算圆直径，得到的圆直径尺寸测量值与校准值之差即为校准结果。

7.4 圆柱直径测量示值误差（ E_{CD} ）

7.4.1 选择MFOV小于或等于30mm的放大倍率测量时，选用0.05mm、0.1mm、0.25mm规格的三个圆柱直径尺寸进行校准；选择MFOV大于30mm的放大倍率测量时，选用0.25mm、0.5mm、1mm规格的圆直柱径尺寸进行校准。对每个放大倍率，按照7.4.2~7.4.4步骤进行校准。

7.4.2 将圆柱标准器放置于载物台上（或使用夹具固定），选择仪器测量空间范围内的3个不同位置进行校准，位置参考7.1.2。每个位置对各校准尺寸点测量一次。

7.4.3 根据仪器使用说明书要求，按照用户实际测量应用条件，完成重建拍摄图像数、

扫描速度等系统参数设置后，对标准圆柱进行扫描重建，获得标准圆柱三维体数据。

7.4.4 使用仪器自带或第三方测量软件，参考GB/T24633.2中给出的采样点提取方案，在圆柱有效三维数据表面提取测量点，利用最小二乘法拟合高斯柱面并计算圆柱直径，得到的圆柱直径尺寸测量值与校准值之差即为校准结果。

7.5 球直径测量示值误差（ E_s ）

7.5.1 标准球直径的选择参考 7.1.1。

7.5.2 将标准球放置于载物台上（或使用夹具固定），选择仪器测量空间范围内的 3 个不同位置进行校准，位置参考 7.1.2。每个位置对各校准尺寸点测量一次。

7.5.3 根据仪器使用说明书要求，按照用户实际测量应用条件，完成重建拍摄图像数、扫描速度等系统参数设置后，对标准球进行扫描重建，获得三维体数据。

7.5.4 使用仪器自带或第三方测量软件，采用 7.1.4 中所述测量点采样方法在球三维数据表面提取测量点，采用最小二乘方法拟合球并计算球直径，得到的球直径尺寸测量值与校准值之差即为校准结果。

7.6 球心距测量示值误差（ E_{SD} ）

7.6.1 标准球棒/板上的球直径的选择参考 7.1.1，并按照球心距不小于 MFOV 的 30%，不大于 MFOV 的 80% 的原则选择一个球心距尺寸进行校准。

7.6.2 将标准球棒/板放置于载物台上（或使用夹具固定），选择仪器测量空间范围内的 3 个不同位置进行校准，位置参考 7.1.2。每个位置测量一次。

7.6.3 根据仪器使用说明书要求，按照用户实际测量应用条件，完成重建拍摄图像数、扫描速度等系统参数设置后，对标准球棒/板进行扫描重建，获得两个标准球三维体数据。由于平面扫描特性，标准球三维数据有效区域选择参考 7.1.3。

7.6.4 使用仪器自带或第三方测量软件，按照 7.1.4 给出的方法，在标准球三维数据表面提取测量点，并利用最小二乘法拟合得到两个标准球的球心坐标并计算球心距，得到的球心距尺寸测量值与校准值之差即为校准结果。

7.7 多视野测量尺寸示值误差（ E_{MFOV} ）

7.7.1 MFOV 大小与标准球直径的选择参考 7.1.1，并按照球心距不小于 MFOV 的 5 倍，不大于仪器最大有效测量范围的 80% 的原则，选择一个球心距尺寸进行校准。

7.7.2 将标准红宝石球棒/板放置于载物台上（或使用夹具固定），选择仪器测量空间范围内的 3 个不同位置进行校准。3 个位置大致摆放如图 5 所示（以标准红宝石球板为例）。每个位置测量一次。

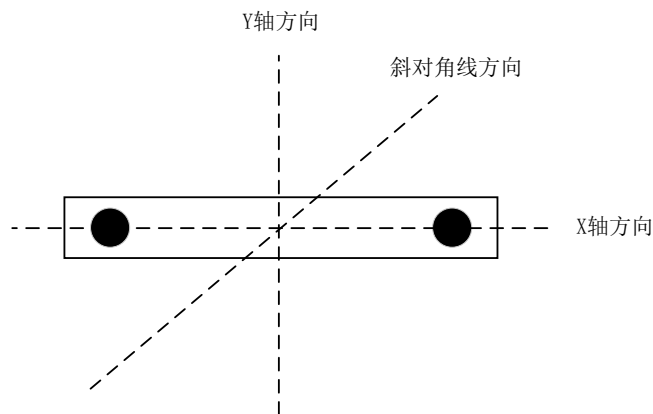


图5 摆放位置分布示意图

7.7.3 根据仪器使用说明书要求,按照用户实际测量应用条件,完成重建拍摄图像数、扫描速度等系统参数设置后,在多视野测量模式下,对标准球棒/板进行扫描重建,获得两个标准球三维体数据。由于平面扫描特性,标准球三维数据有效区域选择参考 7.1.3。

7.7.4 使用仪器自带或第三方测量软件,按照 7.1.4 给出的方法,在标准球三维数据表面提取测量点,并利用最小二乘法拟合得到两个标准球的球心坐标并计算球心距,得到的球心距尺寸测量值与校准值之差即为校准结果。

7.8 结构分辨力

7.8.1 将分辨力卡放置于载物台上(或使用夹具固定),在仪器有效测量范围内任一位置进行校准,根据仪器使用说明书要求,按照用户实际测量应用条件,完成重建拍摄图像数、扫描速度等系统参数设置后,对分辨力卡进行扫描重建,获得分辨力卡的三维体数据。

7.8.2 使用仪器自带或第三方测量软件,对分辨力卡三维数据进行切片分析,通过人工观察判读的方式,得到能够清晰辨别分辨力卡最小线栅格特征对应的线栅格间距,作为校准值。

7.8.3 重复 7.7.1~7.7.2 步骤测量三次,使用三次校准值中的最大值作为校准结果,扫描重建用于判读的分辨力卡线栅格图像应在原始记录及校准证书中给出。

8 校准结果表达

平面扫描式X射线尺寸测量机经校准后出具校准证书,校准证书应符合JJF 1071-2010中5.12的要求,校准证书格式见附录B。测量不确定度的评定应符合 JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》的要求,圆柱直径测量不确定度评定示例见附录C。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等因素所决定,因此复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定,一般不超过12个月。

附录 A

原始记录格式

委托方名称		委托方地址	
被测设备		制造者	
型号		编号	
依据文件		校准地点	
温度		湿度	

计量标准器信息

标准器名称	测量范围	技术指标	溯源证书	有效期

1 探测形状误差

1.1 探测形状误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置						
参数名称	管电压 (kV)	管电流 (μ A)	MFOV (mm)	重建拍摄图像数 (张)	扫描时间 (s)	体素尺寸 (μ m)
放大倍率 1						
放大倍率 2						
测量策略	采集点数		测点分布	拟合方法	滤波设置	粗差去除

1.2 探测形状误差测量结果：

(单位：mm)

	放大倍率1			放大倍率2		
摆放位置	1	2	3	1	2	3
探测形状误差						

测量结果的扩展不确定度： $U = \quad \mu\text{m}$, $k=2$ 。

2 线宽测量示值误差

2.1 线宽测量示值误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置						
参数名称	管电压 (kV)	管电流 (μ A)	MFOV (mm)	重建拍摄图像数 (张)	扫描时间 (s)	体素尺寸 (μ m)
放大倍率 1						
放大倍率 2						
测量策略	采集点数		测点分布	拟合方法	滤波设置	粗差去除

2.2 线宽测量示值误差测量结果

(单位: mm)

倍率类别	放大倍率1			放大倍率2		
测试位置	1	2	3	1	2	3
线宽校准值						
线宽测量值						
线宽测量误差						

3 圆直径测量示值误差

3.1 圆直径测量示值误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置						
参数名称	管电压 (kV)	管电流 (μ A)	MFOV (mm)	重建拍摄图像数 (张)	扫描时间 (s)	体素尺寸 (μ m)
放大倍率 1						
放大倍率 2						
测量策略	采集点数		测点分布	拟合方法	滤波设置	粗差去除

3.2 圆直径测量示值误差测量结果

(单位：mm)

倍率类别	放大倍率1			放大倍率2		
测试位置	1	2	3	1	2	3
圆直径校准值						
圆直径测量值						
圆直径测量误差						

4 圆柱直径测量示值误差

4.1 圆柱直径测量示值误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置						
参数名称	管电压 (kV)	管电流 (μ A)	MFOV (mm)	重建拍摄图像数 (张)	扫描时间 (s)	体素尺寸 (μ m)
放大倍率 1						
放大倍率 2						
测量策略	采集点数		测点分布	拟合方法	滤波设置	粗差去除

4.2 圆柱直径测量示值误差测量结果

(单位：mm)

倍率类别	放大倍率1			放大倍率2		
测试位置	1	2	3	1	2	3
圆柱直径校准值						
圆柱直径测量值						
圆柱直径测量误差						

5 球直径测量示值误差

5.1 球直径测量示值误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置						
参数名称	管电压 (kV)	管电流 (μ A)	MFOV (mm)	重建拍摄图像数 (张)	扫描时间 (s)	体素尺寸 (μ m)
放大倍率 1						
放大倍率 2						
测量策略	采集点数		测点分布	拟合方法	滤波设置	粗差去除

5.2 球直径测量示值误差测量结果

(单位: mm)

倍率类别	放大倍率1			放大倍率2		
测试位置	1	2	3	1	2	3
球直径校准值						
球直径测量值						
球直径测量误差						

6 球心距测量示值误差

6.1 球心距测量示值误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置						
参数名称	管电压 (kV)	管电流 (μ A)	MFOV (mm)	重建拍摄图像数 (张)	扫描时间 (s)	体素尺寸 (μ m)
放大倍率 1						
放大倍率 2						
测量策略	采集点数		测点分布	拟合方法	滤波设置	粗差去除

6.2 球心距测量示值误差测量结果

(单位：mm)

倍率类别	放大倍率1			放大倍率2		
测试位置	1	2	3	1	2	3
球心距校准值						
球心距测量值						
球心距测量误差						

7 多视野测量尺寸示值误差

7.1 多视野测量尺寸示值误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置						
参数名称	管电压 (kV)	管电流 (μ A)	MFOV (mm)	重建拍摄图像数 (张)	扫描时间 (s)	体素尺寸 (μ m)
放大倍率 1						
放大倍率 2						
测量策略	采集点数		测点分布	拟合方法	滤波设置	粗差去除

7.2 多视野测量尺寸示值误差测量结果

(单位：mm)

倍率类别	放大倍率1			放大倍率2		
测试位置	X轴方向	Y轴方向	斜对角线 方向	X轴方向	Y轴方向	斜对角线方 向
球心距校准值						
球心距测量值						
球心距测量误差						

8 结构分辨力

被校准仪器扫描参数设置						
放大倍率	管电压 (kV)	管电流 (μ A)	MFOV (mm)	重建拍摄图像数 (张)	扫描时间 (s)	体素尺寸 (μ m)

分辨力卡重建图：

结构分辨力校准结果：

(单位： μ m)

	结构分辨力示值判断		
判断次数	1	2	3
校准员判断			

校准人：

核验人：

原始记录编号：

附录 B

校准证书内页格式

1 探测形状误差

1.1 探测形状误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置				测量策略	
参数名称	单位	放大倍率 1	放大倍率 2	采集点数	
MFOV	mm			滤波设置	
重建拍摄图像数	张			粗差去除	
体素尺寸	μm			/	/

1.2 探测形状误差测量结果：（单位：mm）

	放大倍率 1			放大倍率 2		
位置	1	2	3	1	2	3
探测形状误差						

测量结果的扩展不确定度： $U = \quad \mu\text{m}$ ， $k = 2$ 。

2 线宽测量示值误差

2.1 线宽测量示值误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置				测量策略	
参数名称	单位	放大倍率 1	放大倍率 2	采集点数	
MFOV	mm			滤波设置	
重建拍摄图像数	张			粗差去除	
体素尺寸	μm			/	/

2.2 线宽测量示值误差测量结果：（单位：mm）

倍率类别	放大倍率1			放大倍率2		
测试位置	1	2	3	1	2	3
线宽测量误差						

测量结果的扩展不确定度： $U = \quad \mu\text{m}$ ， $k = 2$ 。

3 圆直径测量示值误差

3.1 圆直径测量示值误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置				测量策略	
参数名称	单位	放大倍率 1	放大倍率 2	采集点数	
MFOV	mm			滤波设置	
重建拍摄图像数	张			粗差去除	
体素尺寸	μ m			/	/

3.2 圆直径测量示值误差测量结果

(单位：mm)

倍率类别	放大倍率1			放大倍率2		
测试位置	1	2	3	1	2	3
圆直径测量误差						

测量结果的扩展不确定度： $U = \quad \mu\text{m}$ ， $k = 2$ 。

4 圆柱直径测量示值误差

4.1 圆柱直径测量示值误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置				测量策略	
参数名称	单位	放大倍率 1	放大倍率 2	采集点数	
MFOV	mm			滤波设置	
重建拍摄图像数	张			粗差去除	
体素尺寸	μ m			/	/

4.2 圆柱直径测量示值误差测量结果

(单位：mm)

倍率类别	放大倍率1			放大倍率2		
测试位置	1	2	3	1	2	3
圆柱直径测量误差						

测量结果的扩展不确定度： $U = \quad \mu\text{m}$ ， $k = 2$ 。

5 球直径测量示值误差

5.1 球直径测量示值误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置				测量策略	
参数名称	单位	放大倍率 1	放大倍率 2	采集点数	
MFOV	mm			滤波设置	
重建拍摄图像数	张			粗差去除	
体素尺寸	μ m			/	/

5.2 球直径测量示值误差测量结果

(单位：mm)

倍率类别	放大倍率1			放大倍率2		
测试位置	1	2	3	1	2	3
球直径测量误差						

测量结果的扩展不确定度： $U = \quad \mu\text{m}$ ， $k = 2$ 。

6 球心距测量示值误差

6.1 球心距测量示值误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置				测量策略	
参数名称	单位	放大倍率 1	放大倍率 2	采集点数	
MFOV	mm			滤波设置	
重建拍摄图像数	张			粗差去除	
体素尺寸	μ m			/	/

6.2 球心距测量示值误差测量结果

(单位：mm)

倍率类别	放大倍率1			放大倍率2		
测试位置	1	2	3	1	2	3
球心距测量误差						

测量结果的扩展不确定度： $U = \quad \mu\text{m}$ ， $k = 2$ 。

7 多视野测量尺寸示值误差

7.1 多视野测量尺寸示值误差校准参数设置

被校准仪器扫描参数设置				测量策略	
参数名称	单位	放大倍率 1	放大倍率 2	采集点数	
MFOV	mm			滤波设置	
重建拍摄图像数	张			粗差去除	
体素尺寸	μm			/	/

7.2 多视野测量尺寸示值误差测量结果

(单位: mm)

倍率类别	放大倍率1			放大倍率2		
测试位置	X轴方向	Y轴方向	斜对角线方向	X轴方向	Y轴方向	斜对角线方向
球心距测量误差						

测量结果的扩展不确定度: $U = \quad \mu\text{m}$, $k = 2$ 。

8 结构分辨力

被校准仪器扫描参数设置			
放大倍率	MFOV (mm)	重建拍摄图像数 (张)	体素尺寸 (μm)

结构分辨力校准结果: $\quad \mu\text{m}$

分辨力卡重建图:

附录 C

圆柱直径测量不确定度评定示例

C.1 测量方法

选用某平面扫描 X 射线尺寸测量机，其测量空间范围为 228mm×145mm，其长度测量最大允许误差标称为±5 μm。选用圆柱标准器，按照 7.1.2 规定的 3 个位置进行校准测量。

使用的圆柱标准器的直径尺寸中，最小直径尺寸校准值为 0.250mm，最大直径尺寸校准值为 1.000mm，圆柱直径校准测量不确定度为 $U=1 \mu\text{m}$ ($k=2$)，其热膨胀系数为 $18 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。测量室环境温度为 $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 。

C.2 数学模型

数学模型见公式 (C.1)。

$$CD_i = M_{cd,i} - D_{cd} \quad (\text{C.1})$$

式中：

CD_i ——第 i 个位置直径测量误差，mm；

$M_{cd,i}$ ——第 i 个测量位置直径测量值，mm；

D_{cd} ——圆柱标准器直径校准值，mm。

C.3 方差和灵敏系数

因为各输入量彼此独立，依不确定度传播率 $u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2$ ，由式 (C.1) 得方差，方差按式 (C.2) 计算。

$$u_c^2(CD) = c_1^2 u^2(M_{cd}) + c_2^2 u^2(D_{cd}) \quad (\text{C.2})$$

式中：

$u(CD)$ ——测量重复性引入的标准不确定度分量；

$u(D_{cd})$ ——标准器具引入的标准不确定度分量。

$$c_1 = \frac{\partial (CD)}{\partial M_{cd}} = 1;$$

$$c_2 = \frac{\partial (CD)}{\partial D_{cd}} = -1。$$

C.4 标准不确定度分量

C.4.1 标准器具引入标准不确定度分量 $u(D_{cd})$ C.4.1.1 圆柱直径误差校准值引入的不确定度分量 $u(D_{cd1})$

圆柱直径由三坐标测量机校准，根据校准证书， $U=1\mu\text{m}$ ，包含因子 $k=2$ ，则圆柱直径误差校准值引入的不确定度分量为：

$$u(D_{cd1}) = \frac{1}{2} = 0.5\mu\text{m}$$

C.4.1.2 圆柱标准器温度差引入的标准不确定度分量 $u(D_{cd2})$

校准过程中，圆柱标准器的温度与被校准时的温度不一致，则该温度将导致该标准器因温度偏离而引入误差，设定温度变化为 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，圆柱标准器热膨胀系数为 $18 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ ，圆柱直径最大直径尺寸为 1.000mm ，按均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，则圆柱标准器温度差引入的标准不确定度分量为：

$$u(D_{cd2}) = \frac{D \times \alpha \times \Delta t}{\sqrt{3}} = \frac{1000\mu\text{m} \times 2^\circ\text{C} \times 18 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}}{\sqrt{3}} \approx 0.03\mu\text{m}$$

C.4.2 测量重复性引入的标准不确定度分量 $u(D_k)$

重复性评价按照 3 组 ($m=3$) 每组 3 次 ($n=3$) 重复测量确定合并样本标准差。设 3 组测量中，每 3 次测量的极差为 R_i ，则该组测量重复性为：

$$s_i = R_i / C \quad (\text{C.3})$$

式中：

C ——极差系数，当 $n=3$ 时， $C=1.69$ 。

取 3 组测量得到的合并样本标准差为：

$$s_p = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^2} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (R_i / C)^2} \quad (\text{C.3})$$

则测量重复性引入的标准不确定度分量：

C.4.3 测量不确定度来源及说明 $u(D_k) = s_p = 0.59\mu\text{m}$

表 C.1 测量不确定度来源及说明

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$	$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$
$u(D_{cd})$	$u(D_{cd1})$ 圆柱直径的校准值引入的不确定度分量	$0.5 \mu\text{m}$	1
	$u(D_{cd2})$ 圆柱直径温度差引入的标准不确定度分量	$0.03 \mu\text{m}$	1

$u(D_k)$	测量重复性引入的标准不确定度分量	$0.59 \mu\text{m}$	-1
----------	------------------	--------------------	----

C.5 合成标准不确定度

上述不确定度分量相互独立，故合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{0.5^2 + 0.03^2 + 0.59^2} = 0.78 \mu\text{m}$$

C.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，圆柱直径测量误差校准结果的扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c = 1.6 \mu\text{m}$$

中华人民共和国
国家计量技术规范
XXXXXXXXXX 校准规范
JJFXXXX—XXXX
国家市场监督管理总局发布